



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

HEAT TRANSFER ON SPRINKLED TUBE BUNDLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ COPEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR KRACÍK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Copek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku

v anglickém jazyce:

Heat transfer on sprinkled tube bundle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je experimentálně stanovit součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek.

Cíle bakalářské práce:

Pro trubkový svazek stanovte pomocí experimentů střední součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek a zjistěte, jaký má vliv změna rozteče, povrchu trubek či teplotní spád na zkoumaný součinitel přestupu tepla.

Seznam odborné literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Vyd. 3. přeprac. /. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.

JIROUŠ, František. Aplikovaný přenos tepla a hmoty. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 207 s. ISBN 978-80-01-04514-5.

JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Kracík

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 16.10.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce s názvem Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku se zabývá experimentálním stanovením součinitele přestupu tepla na skrápěném trubkovém svazku. Cílem je naměřit, porovnat a zhodnotit hodnoty a průběhy součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky v závislosti na velikosti průtoku skrápěcí kapaliny. Vyhodnocení bude provedena z hlediska velikosti roztečí mezi trubkami, podle typu jednotlivých povrchů a vlivu různých teplotních spádů.

Měření probíhalo při atmosférickém tlaku. Teplá voda proudící v trubkovém svazku je ochlazována studenou skrápěcí vodou. Svazek se skládá z deseti trubek, umístěných horizontálně pod sebou, s hladkým, rádlovaným nebo pískovaným povrchem. Rozteče na trubkách se pohybují od 15 do 30 mm. Pro každou rozteč je provedeno měření o dvou teplotních spádech 15-40 a 15-45 (15°C je teplota vody skrápěcí kapaliny v distribuční trubce; 40°C nebo 45°C je teplota vody na vstupu do trubkového svazku).

ABSTRACT

This bachelor thesis named Heat transfer on sprinkled tube bundle deals with experimental assesment of heat transfer coefficient on sprikled tube bundle. Its goal is to measure, compare and evaluate values and trends of heat transfer coefficient on external surface according to flow rate of cooling water. Evaluation will be focused on size of pitch between tubes, type of tubes surface and influence of temperature gradient.

Measurement was ongoing at atmospheric pressure. Warm water flowing in tube bundle is cooled by cold sprinkling water. Tube bundle consists of ten tubes located horizontally beneath each other with smooth, grooved or sanblasted surface. Distance between tubes vary from 15 to 35 milimetres. Measurement of two temperature gradients 15-40 and 15-45 (15°C is temperature of sprinkling water in distribution tube; 40°C or 45°C is temperature of water entering the tube bundle) is carried out for each pitch and tube surface.

KLÍČOVÁ SLOVA

Součinitel přestupu tepla, přestup tepla, skrápění

KEY WORDS

Heat transfer coefficient, heat transfer, sprinkled

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

COPEK, T. *Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kracík.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a literárních zdrojů uvedených v mé práci.

V Brně, dne

Podpis

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych touto cestou poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Petru Kracíkovi za trpělivost, vstřícnost, ochotu a velmi cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl využít této příležitosti k poděkování své rodině za veškerou podporu v mém dosavadním studiu.

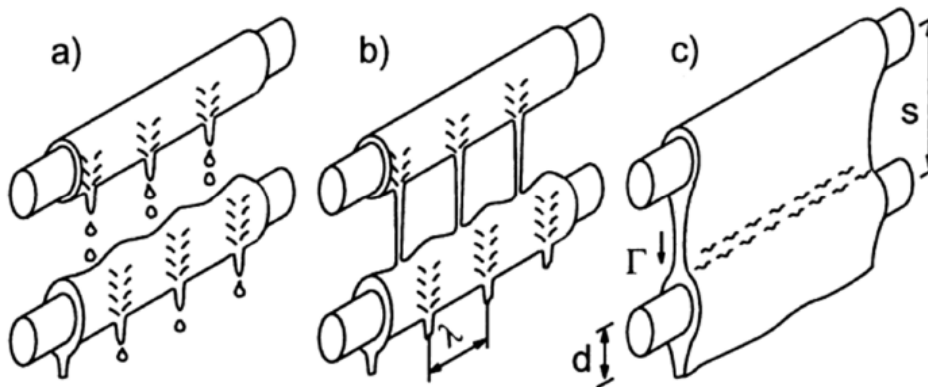
PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

OBSAH

ÚVOD	14
1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	15
1.1 Součinitel přestupu tepla.....	15
1.1.1 Definice součinitele přestupu tepla.....	15
1.1.2 Určení součinitele přestupu tepla	15
1.2 Mezní vrstva	16
2 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN	18
2.1 Měření teploty.....	18
2.1.1 Termočlánky	18
2.2 Měření průtoku	20
3 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	22
4 MATEMATICKÉ STANOVENÍ SOUČ. PŘESTUPU TEPLA	24
4.1 Tepelná bilance výměníku	24
4.2 Výpočet přestupu tepla ve výměníku.....	24
4.3 Výpočet součinitele přestupu tepla na povrchu trubek	25
5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	28
5.1 Vyhodnocení dat z hlediska povrchů skrápěné trubky	30
5.2 Vyhodnocení z hlediska jednotlivých roztečí	32
5.3 Vyhodnocení z hlediska teplotních spádů.....	34
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	36
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	37
SEZNAM OBRÁZKŮ	38
SEZNAM TABULEK	38

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU**ÚVOD**

Na povrchu trubkového svazku se při skrápění kapalinou o malém průtoku vytváří tenká kapalná vrstva. Jsou rozlišovány tři základní režimy skrápění v závislosti na velikosti průtoku, a to (s rostoucí velikostí průtoku): kapkový (a), sloupcový (b) a listový (někdy též blánový) (c). Tyto tři režimy jsou znázorněny na Obr.1. [6]



Obr. 1 Režimy skrápění [7]

Na typ režimu skrápění má vliv zejména horizontální rozteč a průměr trubek, fyzikální vlastnosti a velikost průtoku stékající kapaliny. Pro přechod mezi kapkovým a sloupcovým režimem platí, že se mezi kapičkami nachází minimálně jeden stabilní sloupec kapaliny. Pro přechod mezi sloupcovým a listovým režimem platí, že dochází ke spojení sloupců a tím se vytvářejí malé listy trojúhelníkového tvaru. V listovém režimu se vyskytují listy i sloupce zároveň. [6]

Tato práce se zabývá experimentálním stanovením součinitele přestupu tepla na skrápěném trubkovém svazku. Cílem této práce je stanovit z prakticky realizovaných měření součinitel přestupu tepla, porovnat jednotlivé výsledky mezi sebou a zhodnotit výsledné průběhy součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky v závislosti na velikosti průtoku skrápěcí kapaliny, velikosti rozteče a druhu povrchu trubek.

1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

1.1 Součinitel přestupu tepla

1.1.1 Definice součinitele přestupu tepla

Při přenosu tepla konvekcí mezi povrchem tělesa a proudící tekutinou je hustota tepelného toku vyjádřena tzv. Newtonovým zákonem

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

kde rozdíl teplot $\Delta T = T_s - T_t$ [K] pro případ, kdy se tekutina ohřívá a $\Delta T = T_t - T_s$ [K] v případě, že se tekutina ochlazuje. Index "s" značí povrch stěny a index "t" kapalinu. α [W.m⁻².K⁻¹] je součinitel přestupu tepla konvekcí. [4]

Součinitel přestupu tepla udává, jak intenzivně probíhá přestup tepla mezi povrchem tělesa a tekutinou. Všeobecně platí, že čím je hodnota součinitele přestupu tepla větší, tím více tepla přechází z povrchu tělesa do tekutiny (v případě, že má těleso větší teplotu než tekutina). [4]

Samotná hodnota součinitele přestupu tepla je závislá zejména na fyzikálních vlastnostech, rychlosti a charakteru proudění tekutiny, na teplotách stěny a tekutiny, na tvaru a rozměrech tělesa a dalších vlastnostech. Platí tedy, že

$$\alpha = f(\rho, \mu, v, c, \lambda, w, t_s, t_t, L) \quad (1.2)$$

kde jednotlivé symboly znamenají (v pořadí v závorce): hustota tekutiny, dynamická a kinematická viskozita tekutiny, měrná tepelná kapacita tekutiny, tepelná vodivost povrchu stěny, rychlost proudění tekutiny, teplota stěny, teplota tekutiny, charakteristický rozměr (např. průměr potrubí). [4]

1.1.2 Určení součinitele přestupu tepla

S přihlédnutím na velký počet parametrů, které ovlivňují hodnotu součinitele přestupu tepla, je nemožné jej stanovit pomocí jedné všeobecné rovnice. Stejně tak by bylo velice obtížné tyto hodnoty tabelovat. K určení součinitele přestupu tepla se používá zejména tři bezrozměrných kritérií, tzv. kritériálních rovnic.

Reynoldsovo kritérium

Platí vztah:

$$Re = \frac{w \cdot L}{\lambda} \quad (1.3)$$

- udává poměr setrvačných a třecích sil, slouží k určení režimu proudění tekutiny (laminární, turbulentní). [4]

Nusseltovo kritérium

Platí vztah:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{L}{\frac{\lambda}{\alpha}} \quad (1.4)$$

- udává konvektivní přenos tepla mezi povrchem stěny a tekutinou, vyjadřuje poměr konvektivního a difúzního přenosu tepla. [4]

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

Prandtlovo kritérium

Platí vztah:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\rho \cdot \nu \cdot c}{\lambda} \quad (1.5)$$

- udává poměr tloušťek hydrodynamické a tepelné mezní vrstvy v proudě tekutiny, zohledňuje fyzikální vlastnosti tekutiny. [4]

Těchto kritérií se následně využívá pro dosazení do kritériální rovnice pro konvektivní přenos tepla, která má obecný tvar

$$Nu = f(Re; Pr) \quad (1.6)$$

1.2 Mezní vrstva

Při přenosu tepla prouděním při vnějším obtékání dochází ke vzniku tzv. mezní vrstvy. Existují dva druhy mezní vrstvy - hydrodynamická a tepelná. Mezní vrstvu ovlivňuje zejména blízkost povrchu stěny. Na povrchu stěny má kapalina vlivem tření a viskozity nulovou rychlost. Se zvětšující se vzdáleností podél stěny roste tloušťka mezní vrstvy. [1]

Kapalinu, která obtéká stěnu trubky, lze rozdělit do dvou oblastí:

- mezní vrstva - tenká vrstva, hydrodynamická nebo tepelná, nacházející se přímo na povrchu stěny. Rychlost se v této vrstvě mění z hodnoty nula (na stěně) až po rychlost volného proudu. Teploty se v této vrstvě mění od hodnoty na stěně až po hodnoty teplot volného proudu. V tepelné mezní vrstvě se teplo postupně šíří do větší vzdálenosti od stěny. V obou mezních vrstvách, tj. tepelné i hydrodynamické, jsou nenulové gradienty teplot resp. průtoku. [1]
- oblast vně mezní vrstvy - gradienty teplot a rychlostí jsou nulové, tj. teplota stěny neovlivňuje proud kapaliny. [1]

Pro tepelnou i hydrodynamickou mezní vrstvu platí, že její tloušťka se vzdáleností podél stěny postupně roste. Teplota kapaliny na povrchu, kde má kapalina nulovou rychlost, je shodná s teplotou povrchu stěny. Částice této tekutiny pak předávají energii sousedním částicím. Tento proces se šíří mezi částicemi do vzdálenosti hranice volného proudu. [1]

Hranice mezi tepelnou mezní vrstvou a volným proudem je definována jako vzdálenost, ve které je rozdíl mezi teplotou stěny a teplotou v dané vzdálenosti od povrchu stěny rovna 99% rozdílu mezi stěnou a volným proudem. [1]

Hodnota součinitele přestupu tepla s rostoucí tloušťkou mezní vrstvy klesá. Je to způsobeno tím, že rozdíl teplot stěny a volného proudu je konstantní, ale jelikož roste vzdálenost, ve které se tento rozdíl teplot vyskytuje, klesá gradient teploty na povrchu. [1]

Také platí, že čím déle se mezní vrstva vyvíjí, tím menší je přestup tepla. S přihlédnutím k tomuto zjištění je tedy vhodné mezní vrstvu "narušovat" pomocí výstupků, drážek či jiných nerovností na povrchu a tím dosáhnout většího přestupu tepla. [1]

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

Při obtékání mohou nastat situace, kdy na povrchu dochází ke vzniku laminárního a turbulentního proudění. Nejprve se v těsné blízkosti povrchu vytvoří velmi tenká vrstva mající charakter laminárního proudění. Dále se vytvoří oblast turbulentního proudění, ve které se vyskytuje soustava vírů. Mezi oblastí laminárního a turbulentního proudění se vyskytuje tzv. přechodná vrstva. [1]

S narůstající tloušťkou mezní vrstvy součinitel přestupu tepla klesá. V turbulentní mezní vrstvě se hodnota součinitele přestupu tepla zvětšuje. Je to způsobeno víry a turbulencemi, které slouží jako dobrý přenosový mechanismus přestupu tepla směrem od povrchu stěny do volného proudu. [1]

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

2 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN**2.1 Měření teploty**

Měření teploty se dělí na dvě skupiny - kontaktní a bezkontaktní. Mezi kontaktní způsoby měření teploty patří např. teploměry a termočlánky. Mezi bezkontaktní patří např. pyrometr či snímání teplot termovizní kamerou.

U měřicího zařízení jsou použity termočlánky, proto je v následujícím textu popis zaměřen pouze na ně.

2.1.1 Termočlánky

Termočlánky jsou přístroje pro měření teploty pracující na principu tzv. termoelektrického jevu.

Termoelektrický jev - při zahřátí jednoho konce spoje uzavřeného okruhu složeného ze dvou kovů, přičemž materiál každého z těchto dvou kovů je různý, dochází na spoji těchto kovů ke vzniku elektrického potenciálu a termoelektrického proudu. Termoelektrický jev se také někdy označuje jako Seebeckův, podle T.J. Seebecka, který jej roku 1821 objevil. [5]

Termočlánek se skládá z teplého a studeného konce. Teplý konec je spoj dvou koncových vodičů, který se nachází v měřeném prostředí. Studený konec se nachází mimo měřené prostředí a bývá na něj napojeno měřicí zařízení (galvanometr, mikrovoltmetr). Spoje jsou zhotoveny tvrdým pájením nebo svařováním. [5]

Konstrukční řešení termočlánků

Tyčové termočlánky - těleso termočlánku je vsunuto do vzduchotěsné keramické trubičky. Těleso je chráněno kovovým pouzdrem. [5]

Trubkové termočlánky - část termočlánku tvoří kovová trubička, do níž je vsunut a zavařen kovový vodič ve formě drátku. [5]

Typy spojů [5]**Uzemněný spoj**

- kontakt je svařen s ochranným pouzdrem
- oproti termočládkům s neuzemněným kontaktem má rychlejší odezvu
- používají se pro měření teploty proudícího nebo statického plynu a kapaliny



Obr. 2 Uzemněný spoj [8]

Neuzemněný spoj

- svařený termočládkový vodič je izolačním materiálem fyzicky oddělen od pouzdra termočlánku
- průměry termočládků bývají v rozmezí 0,2 - 6 mm
- doporučuje se pro měření v korozivním prostředí



Obr. 3 Neuzemněný spoj [8]

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

Nechráněný spoj

- kontakt vyčnívá z ochranného kovového pouzdra, poskytuje tak rychlou a přesnou odezvu
- doporučuje se pro měření proudících nebo statických plynů



Obr. 4 Nechráněný spoj [8]

Rozdělení termočlánků [5]

Jedním z dalších možných dělení termočlánků je podle kovů, ze kterých jsou vyrobeny spoje. Značení termočlánků odpovídá chemickým značkám těchto kovů.

Termočlánky typu T: Cu-ko (měď-konstantan) - kladným elementem je v tomto uspořádání Cu, záporným konstantan.

Termočlánky typu J: Fe-ko (železo-konstantan) - kladným elementem je Fe, záporným konstantan. Tento typ termočlánků vykazuje horší odolnost proti korozi.

Termočlánky typu K: Kladný element je slitina Ni a Cr, záporný Ni. Využívají se pro měření vyšších teplot.

Tab. 1 Přehled nejčastěji používaných termočlánků [5]

Označení	T (Cu-ko)	J (Fe-ko)	K (CH-A)	S (PtRh-10Pt)	B (PtRh30-pTrH6)
Rozsah [°C] krátkodobě	-200 ÷ 400 600 °C	-200 ÷ 600 900 °C	-50 ÷ 1000 1300 °C	0 ÷ 1300 1700 °C	1000 ÷ 1600 1800 °C
Termoelektr. napětí mV/100 °C	4,25	5,37	4,8	0,64	
Dovolená odchylka [°C]		-100 ÷ 400 °C ± 3 °C Do 900 °C podle $\pm [3 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot (t - 400)]$	Do 400 °C ± 4 °C Od 400 °C podle $\pm [3 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot (t - 400)]$	Do 600 °C ± 3 °C Od 600 °C podle ± $[3 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot (t - 600)]$	Od 600 °C podle ± $[3 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot (t - 600)]$
Barevné označení	Hnědý	Modrý	Žlutý (NiCr-Ni zelený)	Bílý	
Odolnost v oxidačním prostředí	Malá	Malá nutno chránit	Velká	Velká nad 1200 chránit	Velká
Odolnost v redukčním prostředí		Velká		Malá nutno chránit	Malá nutno chránit
Malá odolnost			SO ₂ - SO ₃	Chránit před Si, P	

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

2.2 Měření průtoku

Mezi možnosti, jak měřit průtok patří například plovákový průtokoměr, venturiho trubice či indukční průtokoměr.

Princip funkce indukčního průtokoměru

Indukční (magnetický) průtokoměr využívá Faradayova indukčního zákona. Čidlo se skládá z nemagnetické a nevodivé trubky. V této trubce se kolmo na směr magnetických siločar nachází dvě měřicí elektrody, které měří indukované napětí. Vytvoření střídavého magnetického pole je realizováno pomocí dvou cívek umístěných ve směru rovnoběžném s rovinou snímacích elektrod. Vodičem elektrického proudu je tekutina. Jejím pohybem v magnetickém poli, o velikosti elektromagnetické indukce B , dochází ke vzniku indukovaného napětí U . Toto napětí je úměrné rychlosti proudění v a délce vodiče l . [9]

Platí vztah:

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (2.1)$$

kde:

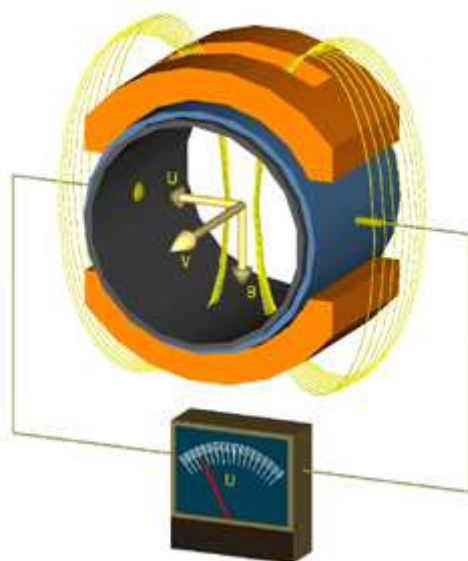
U [V]	- indukované napětí
B [T]	- hustota magnetického toku
l [m]	- vzdálenost měřicích elektrod
v [m.s ⁻¹]	- rychlost proudění média

Pro daný průtokoměr mají elektrody stejnou konstantní vzdálenost a magnetickou indukci. Indukované napětí je tak přímo úměrné rychlosti proudění média. Pro přepočítání na objemový průtok se použije vztahu

$$Q = v \cdot S \quad (2.2)$$

kde:

Q [m ³ .min ⁻¹]	- objemový průtok
v [m.s ⁻¹]	- rychlost proudění média
S [m ²]	- průtočný průřez



Obr. 5 Schéma indukčního průtokoměru [9]

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

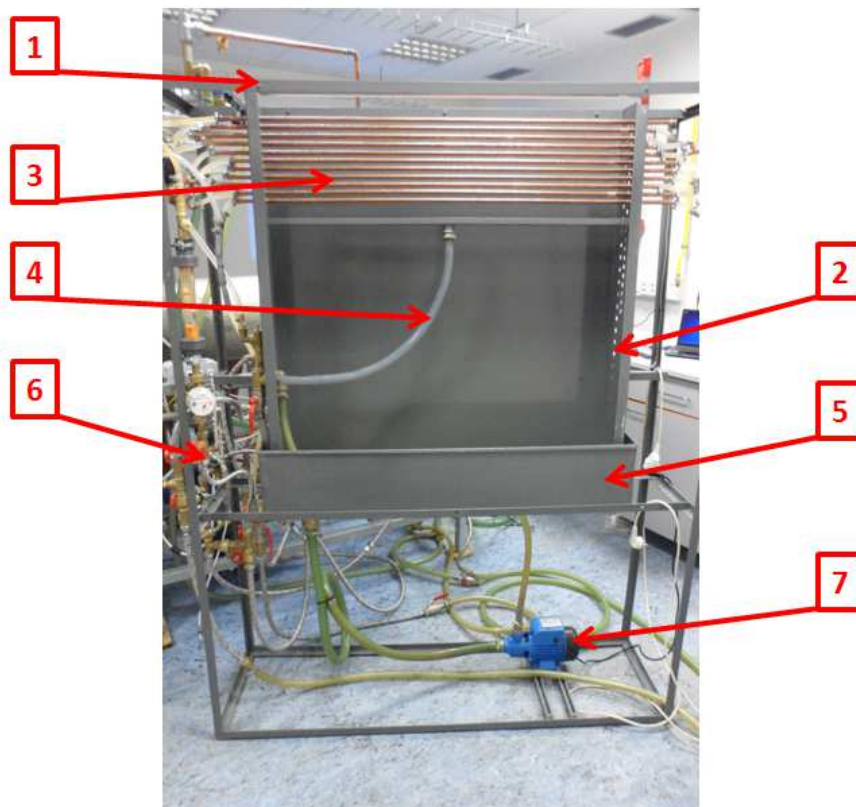
Výhody použití indukčního průtokoměru [9]

- vysoká přesnost měření, spolehlivost, nízké nároky na údržbu
- široký rozsah měřených hodnot
- nezpůsobují průtočné ztráty v potrubí

V měřícím zařízení pro vlastní experimentální měření jsou použity průtokoměry FLOMAG se snímačem typu B a převodníkem FLOMAG3000. Používají se k měření objemových průtoků ve skrápěcí a skrápěné větvi trubkového svazku.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU**3 POPIS MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ**

Měřicí zařízení pracuje při atmosférickém tlaku. Skládá se z rámu(1), distančního plechu(2), trubkového svazku(3), sběrače skrápěcí kapaliny(4), vany(5), hydraulických rozvodů a měřících zařízení(6) a čerpadla(7).



Obr. 6 Měřicí zařízení

Rám slouží jako nosný bod pro distanční plech, vanu, hydraulické rozvody a čerpadlo.

V distančním plechu jsou vyvrtány díry pro uložení trubek. Díry jsou uspořádány do pěti řad podle jednotlivých roztečí, přičemž v každé řadě je vyvrtáno dvacet jedna děr. První vrchní díra je určena pro distribuční trubku, která rozvádí skrápěcí kapalinu.

Jsou použity měděné trubky. Skrápěcí trubka je zcela hladká a má na povrchu v jedné řadě malé otvory o průměru 1,0 mm s roztečí děr 9,2 mm, kterými se skrápí studenou vodou trubky pod nimi. Skrápěnými trubkami o středním průměru 12 mm proudí ze zdola směrem nahoru teplejší médium, které předává teplo skrápěcí kapalině a postupně se ochlazuje. Spoj mezi jednotlivými trubkami je realizován pomocí gumových hadiček, které jsou staženy na koncích trubek kovovými objímkami. Skrápěné trubky jsou vyrobeny s různými typy vnějších povrchů (hladké, rádlované, pískované). Pro jednotlivá měření se používají skupiny trubek se stejným povrchem.

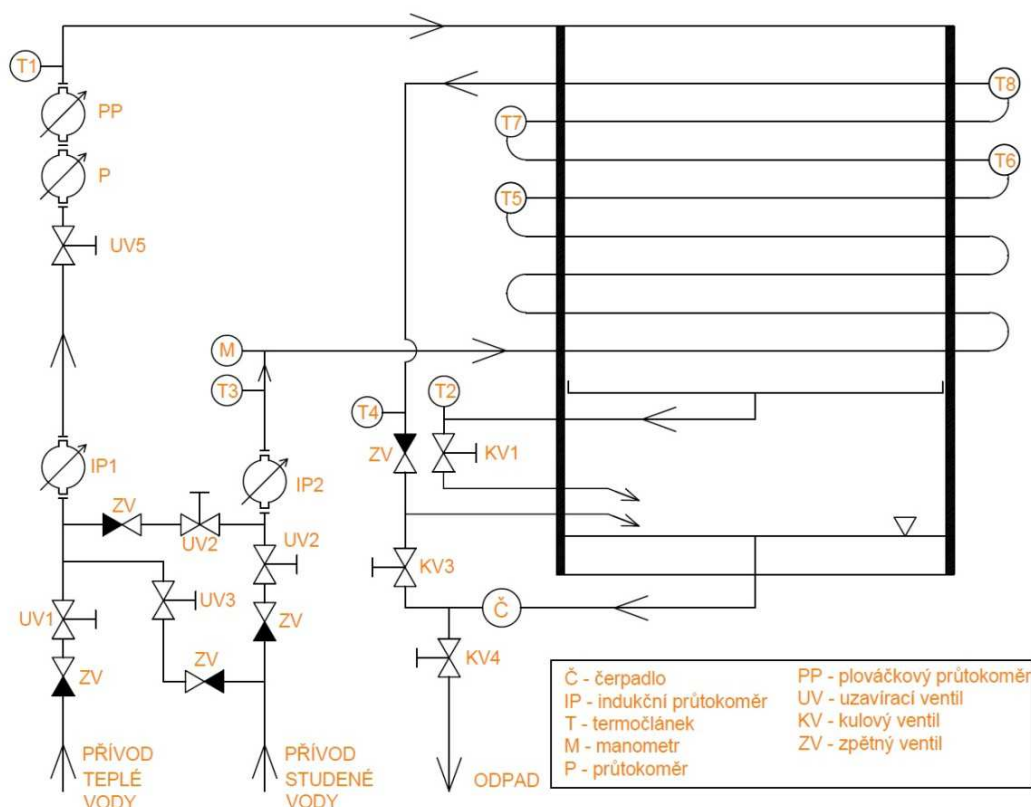
Pod skrápěnými trubkami je umístěn sběrač skrápěcí kapaliny. Ten slouží jako odvod kapaliny, ve kterém je zabudován termočlánek, který měří teplotu (t_2).

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

Hydraulické rozvody slouží k nastavení a regulaci průtoků a jejich teplot. Skládají se z hadic pro rozvod a odvod kapaliny. Dále pak z regulačních prvků, jako jsou ventily a šoupátka, kterými se reguluje průtočné množství a poměr teplé a studené vody v jednotlivých větvích. Okamžitý průtok na skrápěcí větví je patrný na plováчковém průtokoměru. Čerpadlo slouží k odčerpávání vody z vany do odpadu.

Měřicí zařízení slouží k monitorování průtoků a teplot v jednotlivých uzlech výměníku, např. teploty na vstupu a výstupu skrápěcí a skrápěné větve. Pro měření teplot se používají termočlánky typu T s neuzemněným koncem. Dále slouží k měření velikosti objemového průtoku ve skrápěcí a skrápěné větvi. Pro měření objemového průtoku se využívá magnetických průtokoměrů FLOMAG se snímačem typu B a převodníkem FLOMAG3000.

Termočlánky a průtokoměry jsou napojeny do měřicí karty DAQ 56, která jejich data dále odesílá do PC, kde jsou programem LabView ukládána pro další zpracování. Program také zobrazuje hodnoty v jednotlivých uzlech výměníku naměřených termočlánky a magnetickými průtokoměry v reálném čase. Konkrétně průtočná množství a teploty na vstupu a výstupu z obou větví. Podle těchto hodnot je možné následně regulovat přívod studené či teplé vody tak, aby bylo dosaženo předem stanovených hodnot pro měření.



Obr. 7 Schéma měřicího zařízení

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

4 MATEMATICKÉ STANOVENÍ SOUČ. PŘESTUPU TEPLA

4.1 Tepelná bilance výměníku

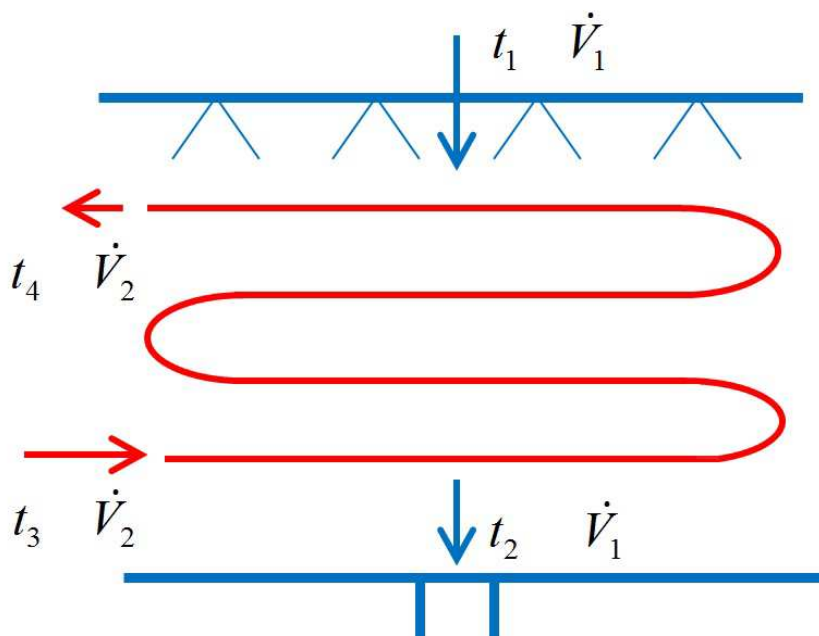
Při tepelné bilanci výměníku se vychází ze zákona zachování energie. Podle Obr. 10 platí, že teplo dodané do soustavy je rovno teplu, které ze soustavy odchází, a ztrátám.

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_3 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_z \quad (4.1)$$

Tepelná bilance skrápěné a skrápěcí větve:

$$\dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_1 + \dot{Q}_z = \dot{Q}_s \quad (4.2)$$

kde levá strana rovnice vyjadřuje teplo do soustavy dodané a pravá rovnice teplo ze soustavy odvedené. Vzhledem k úplnému pokrytí výměníku skrápěnou kapalinou přechází teplo do skrápěcí kapaliny a nedochází ke ztrátám do okolí.

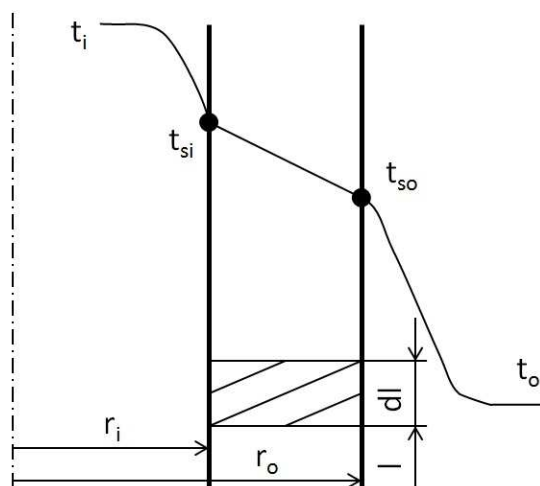


Obr. 8 Schéma tepelného výměníku

4.2 Výpočet přestupu tepla ve výměníku

Uvnitř trubek protéká teplejší médium (voda), které je ochlazováno chladnějším skrápěcím médiem (vodou). Přestup tepla se děje z teplejšího média do chladněšího. Nejprve dochází k přenosu tepla konvekcí z teplejšího média do vnitřní stěny trubky podle Newtonova zákona pro přestup tepla konvekcí, poté vedením stěnou trubky podle Fourierova zákona pro kondukcí a nakonec konvekcí mezi stěnou trubky a chladnějším médiem podle Newtonova zákona pro přestup tepla konvekcí.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU



Obr. 9 Přestup tepla stěnou

Pro přestup tepla konvekcí mezi médiem uvnitř trubky a vnitřní stěnou trubky platí podle Newtonova zákona pro přestup tepla konvekcí vztah

$$d\dot{Q}_S = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_i \cdot \alpha_i \cdot (t_i - t_{si}) dx \quad (4.3)$$

kde x leží v intervalu $\langle 0; l \rangle$, kde " l " je celková délka trubek skrápěného svazku.

Pro přestup tepla vedením uvnitř stěny trubky platí Fourierův zákon pro kondukci ve tvaru

$$d\dot{Q}_S = -2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \cdot \lambda_s \frac{dt}{dr} dx \quad (4.4)$$

kde x leží v intervalu $\langle 0; l \rangle$. Po algebraické úpravě rovnice (4.4) a integraci v mezích $\langle r_i; r_o \rangle$ a $\langle t_{si}; t_{so} \rangle$ dostáváme

$$d\dot{Q}_S \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_s \cdot (t_{si} - t_{so}) dx \quad (4.5)$$

Pro přestup tepla konvekcí mezi vnější stěnou trubky a chladnějším médiem platí podle Newtonova zákona pro přestup tepla konvekcí vztah

$$d\dot{Q}_S = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_o \cdot \alpha_o \cdot (t_{so} - t_o) dx \quad (4.6)$$

kde x leží v intervalu $\langle 0; l \rangle$

4.3 Výpočet součinitele přestupu tepla na povrchu trubek

Stanovení součinitele prostupu tepla

Pro odvození vztahu pro součinitel prostupu tepla je provedena úprava rovnic (4.3), (4.5) a (4.6) do tvaru

$$d\dot{Q}_S \cdot \frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (t_i - t_{si}) dx \quad (4.7)$$

$$d\dot{Q}_S \cdot \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (t_{si} - t_{so}) dx \quad (4.8)$$

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

$$d\dot{Q}_S \cdot \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (t_{so} - t_o) dx \quad (4.9)$$

sečtením rovnic dostáváme

$$d\dot{Q}_S \left(\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o} \right) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (t_i - t_o) dx \quad (4.10)$$

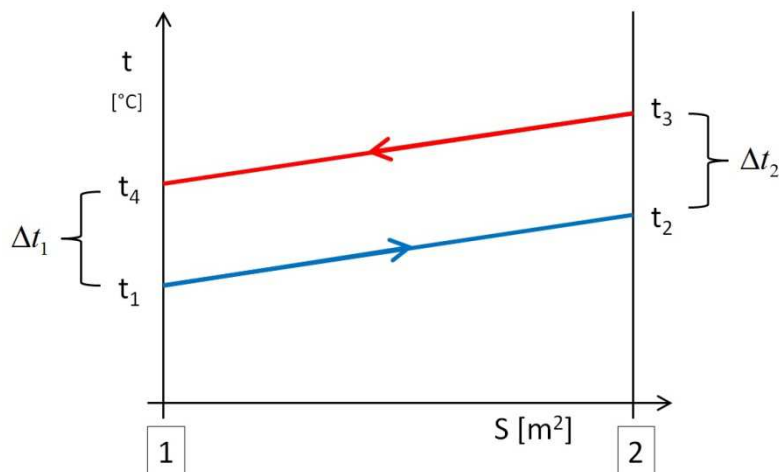
Z této rovnice lze vyjádřit součinitel prostupu tepla

$$k_L = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (4.11)$$

a pomocí zbývajících členů rovnice lze vyjádřit vztah pro tepelný tok s využitím součinitele prostupu tepla

$$d\dot{Q}_S = k_L \cdot n \cdot (t_i - t_o) dx \quad (4.12)$$

kde počet řad $n=1$ a dx náleží intervalu $<0;l>$. Jedná se o výměník s křížovým protiproudým uspořádáním.



Obr. 10 Schéma křížového uspořádání výměníku

Rozdíl teplot je nutné zaměnit za logaritmický teplotní spád vzhledem k nerovnoměrnému teplotnímu rozložení

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right)} = \frac{(t_3 - t_2) - (t_4 - t_1)}{\ln \left(\frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} \right)} \quad (4.13)$$

tepelný tok je po dosazení

$$\dot{Q}_S = k_L \cdot \Delta t_{ln} \cdot l \quad (4.14)$$

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

Stanovení součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubek

Při stanovení součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubek je vycházeno z kritériálních rovnic.

Střední Nusseltovo číslo pro nucenou konvekci v kruhové trubce podle [2]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (4.15)$$

kde $n=0,3$ (tekutina se ochlazuje)

Reynoldsova kritériální rovnice

$$Re = \frac{w \cdot d_i}{\nu} \quad (4.16)$$

Prandtlůva kritériální rovnice

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (4.17)$$

Nusseltova kritériální rovnice

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} \quad (4.18)$$

Algebraickými úpravami a dosazením za jednotlivé členy do rovnice (4.15) dostáváme vztah pro součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubek

$$\alpha_i = \frac{\lambda \cdot 0,023 \cdot \left(\frac{w \cdot d_i}{\nu}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\nu}{\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}}\right)^{0,3}}{d_i} \quad (4.19)$$

Stanovení součinitele přestupu tepla na vnější straně trubek

Pro stanovení součinitele přestupu tepla na vnější straně trubek porovnáme dvě rovnice pro tepelný tok

$$\dot{Q}_S = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_3 - t_4) \quad (4.20)$$

úpravou hmotnostního průtoku dostáváme rovnici pro tepelný tok ve tvaru

$$\dot{Q}_S = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (t_3 - t_4) \quad (4.21)$$

rovnici (4.21) porovnáme s rovnicí (4.14)

$$\dot{Q}_S = k_L \cdot \Delta t_{ln} \cdot l = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (t_3 - t_4) \quad (4.22)$$

a dostáváme vztah pro stanovení součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky ve tvaru

$$\alpha_o = \frac{1}{r_o \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta t_{ln}}{\rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (t_3 - t_4)} - \frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} - \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} \right)} \quad (4.23)$$

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Do trubkového svazku vtéká teplá voda o požadované teplotě t_3 (40°C nebo 45°C) a objemovém průtoku $\dot{V}_2 = 7,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato voda je ochlazována studenou skrápěcí kapalinou a vytéká ze svazku o teplotě t_4 . Studená skrápěcí kapalina je nad výměník přiváděna do distribuční trubky o požadované teplotě t_1 (15°C) a o požadovaném objemovém průtoku \dot{V}_1 . Tato voda ochlazuje vodu proudící v trubkách, přijímá její teplo a teplota roste na teplotu t_2 na výstupu.

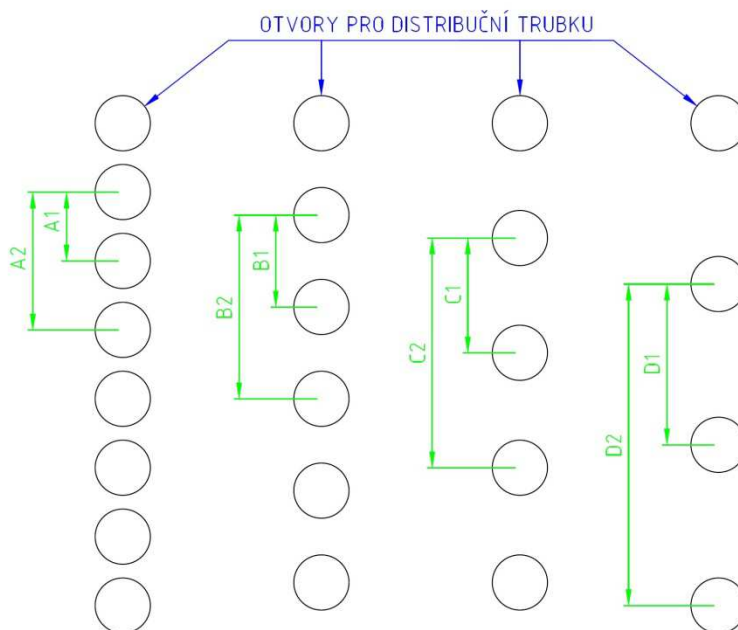
Při měření bylo třeba nastavit a následně udržovat měřené parametry na předem daných hodnotách. Jedná se o vstupní teplotu do skrápěcí a skrápěné větve. Dále je třeba udržovat průtok uvnitř skrápěných trubek na konstantní hodnotě. Hodnoty se mohly pohybovat v tolerančním rozsahu $\pm 1^\circ\text{C}$ u teplot a $\pm 0,1 \text{ l/min}$ u průtoku. Měření začínalo na maximálním průtoku skrápěcí kapaliny, jež se následně velmi pomalu snižoval s dočasným setrváním na dílčích zkoumaných průtocích. Během měření bylo třeba regulovat průtoky v jednotlivých větvích a upravovat poměr studené a teplé vody tak, aby bylo stále dosaženo předem stanovených hodnot vstupních teplot a průtoku uvnitř skrápěných trubek.

Měření bylo prováděno na trubkovém svazku skládajícího se z 10 trubek na roztečích A1, A2, B1 a C1, přičemž trubky pro jednotlivá měření mají vždy stejný povrch. Tlak v trubkách je přibližně 1 bar.

Souhrn roztečí a jím odpovídajících vzdáleností mezi trubkami je uveden v tabulce 2.

Tab. 2 Rozteče na trubkovém svazku

Označení	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Rozteč [mm]	15	30	20	40	25	50	35	70



Obr. 11 Schéma roztečí na trubkovém svazku

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

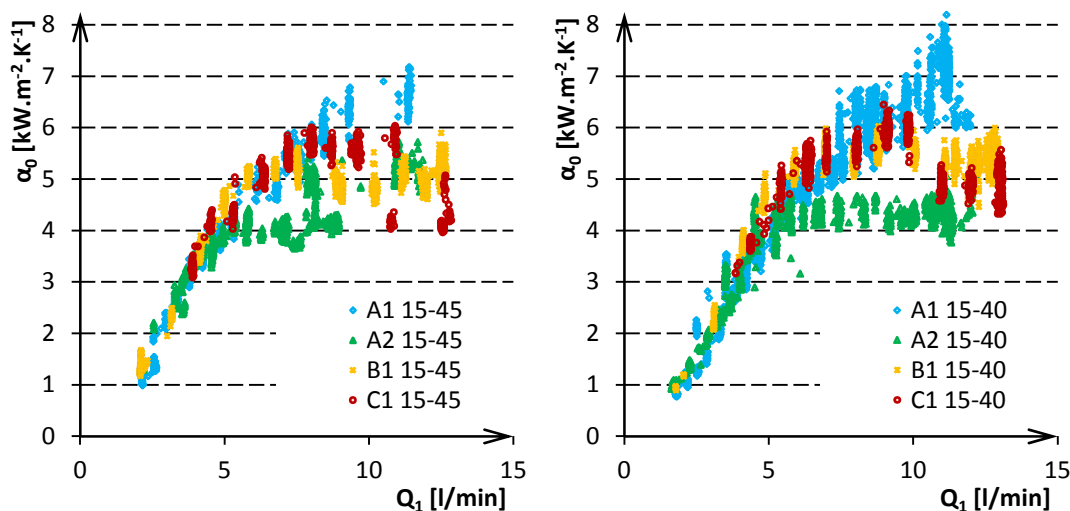
Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny v prostředí Microsoft Excel, ve kterém byly využity parní tabulky X-STEAM [10]. Souhrn základních naměřených veličin pro jednotlivé povrchy a rozteče jsou patrné v tabulce 3.

Tab. 3 Souhrn základních naměřených dat

Povrch	rozteč	Délka [m]	Počet hodnot	t_1 [°C]	t_3 [°C]	V_1 [l/min]	V_2 [l/min]
hladký	A1	10	945	15,0±0,54	44,8±0,57	2,1-11,5	7,19±0,05
hladký	A1	10	2367	15,0±0,43	40,0±0,53	1,7-12,0	7,22±0,05
hladký	A2	10	1083	14,8±0,43	45,1±0,53	2,2-11,9	7,22±0,05
hladký	A2	10	1313	15,2±0,44	40,3±0,51	1,6-12,2	7,22±0,05
hladký	B1	10	999	14,8±0,59	45,3±0,50	2,1-12,7	7,22±0,06
hladký	B1	10	1117	14,8±0,49	40,1±0,59	1,8-12,9	7,21±0,05
hladký	C1	10	773	15,1±0,49	45,0±0,56	3,8-12,8	7,21±0,06
hladký	C1	10	881	15,2±0,45	40,1±0,64	3,8-13,1	7,21±0,05
pískovaný	A1	10	666	14,9±0,44	44,4±0,28	2,8-12,6	7,19±0,06
pískovaný	A1	10	633	14,7±0,37	39,7±0,48	3,1-11,7	7,21±0,04
pískovaný	A2	10	584	15,2±0,34	45,2±0,36	1,2-12,8	7,20±0,05
pískovaný	A2	10	1470	15,2±0,25	40,1±0,56	1,9-12,7	7,22±0,05
pískovaný	B1	10	1376	14,5±0,39	45,3±0,56	0,7-11,5	7,20±0,05
pískovaný	B1	10	1145	15,1±0,34	40,4±0,36	1,4-12,5	7,20±0,05
pískovaný	C1	10	1711	14,8±0,31	45,3±0,41	1,8-12,1	7,22±0,05
pískovaný	C1	10	1164	15,3±0,41	40,3±0,37	2,6-12,7	7,23±0,05
rádlovaný	A1	10	442	14,8±0,51	45,2±0,43	3,8-14,9	7,23±0,04
rádlovaný	A1	10	1366	15,0±0,48	40,0±0,57	2,2-12,8	7,22±0,05
rádlovaný	A2	10	961	14,7±0,41	45,2±0,47	1,6-11,8	7,21±0,05
rádlovaný	A2	10	1220	15,2±0,48	40,0±0,49	2,3-13,6	7,22±0,04
rádlovaný	B1	10	1112	14,8±0,45	45,1±0,54	2,1-12,4	7,23±0,04
rádlovaný	B1	10	771	15,2±0,56	40,3±0,53	2,1-12,7	7,22±0,05
rádlovaný	C1	10	587	15,0±0,55	45,1±0,59	2,0-12,7	7,23±0,05
rádlovaný	C1	10	1221	15,2±0,42	40,5±0,39	2,2-13,4	7,22±0,05

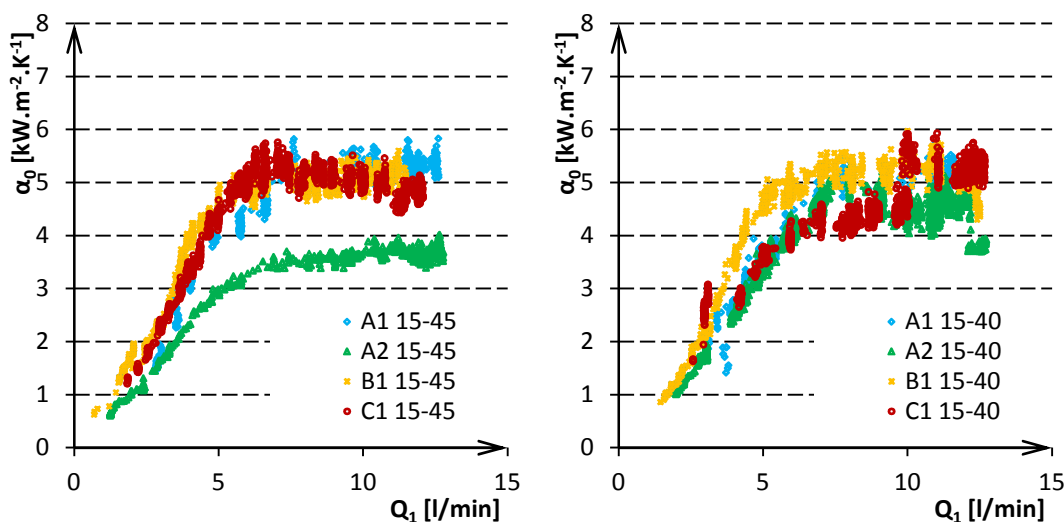
PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

5.1 Vyhodnocení dat z hlediska povrchů skrápěné trubky



Obr. 12 Hladký povrch

Z grafů pro hladký povrch je patrné, že do velikosti průtoku cca 4,5 l/min skrápěcí kapaliny součinitel přestupu tepla přibližně lineárně roste nezávisle na velikosti rozteče trubek. Při průtoku nad 5 l/min se začíná výrazně projevovat vzdálenost mezi trubkami u jednotlivých roztečí. Největší hodnoty součinitele přestupu tepla vykazuje rozteč A1 s maximální hodnotou mírně přesahující 7,0 resp. 8,0 $\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ u spádu 15-45 resp. 15-40. Rozteče B1 a C1 mají přibližně stejný průběh i velikost součinitele přestupu tepla s maximální hodnotou cca 6 $\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Nejmenší hodnoty součinitele přestupu tepla při průtoku nad 5 l/min byly naměřeny u rozteče A2, a to s maximem kolem 5 $\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Maximální rozdíl součinitele přestupu tepla dosahuje přibližně 2,5 $\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ mezi roztečemi A1 a A2.

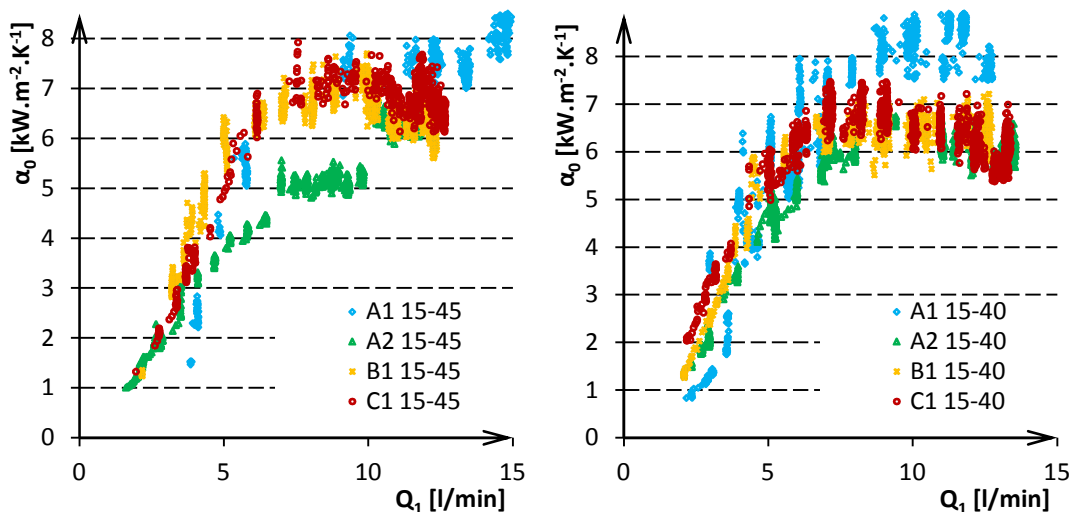


Obr. 13 Pískovaný povrch

U trubkového svazku s pískovaným povrchem je možné vidět u teplotního spádu 15-45 přibližně lineárně rostoucí průběh do cca 6,0 l/min. Největších hodnot součinitele přestupu tepla, s hodnotami nepřesahujícími 6,0 $\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, bylo

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

dosaženo u roztečí A1, B1 a C1, u kterých nelze jasně stanovit výhodnost rozteče, resp. naměřené průběhy se prolínají. Oproti tomu na rozteči A2 je nevýhodnost od počátku patrná s tím, že součinitel přestupu tepla je zde nižší a maximální hodnoty leží pod hranicí $4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. U spádu 15-40 je průběh na všech roztečích velmi podobný. Největších hodnot součinitele přestupu tepla dosahují rozteče B1 a C1, nejmenších A2. Rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je přibližně $2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. U rozteče B1 je možné pozorovat strmější nárůst při nižších průtocích oproti ostatním roztečím.



Obr. 14 Rádlovaný povrch

V případě trubek s rádlovaným povrchem lze pozorovat, že do průtoku 6,0 l/min hodnota součinitele přestupu tepla lineárně roste pro oba měřené spády. U spádu 15-45 je patrný odklon u rozteče A2, která vykazuje nižší hodnoty. Nejvyšších hodnot součinitele přestupu tepla bylo naměřeno u rozteče A1, s maximální hodnotou přesahující $8,0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Průběh u roztečí B1 a C1 je podobný. Pro spád 15-40 je z grafu patrné, že největší součinitel přestupu tepla je na rozteči A1 s maximem na $9,0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Naproti tomu u roztečí A2, B1, C1 je průběh téměř totožný. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou je poměrně výrazný, a to cca $3,0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

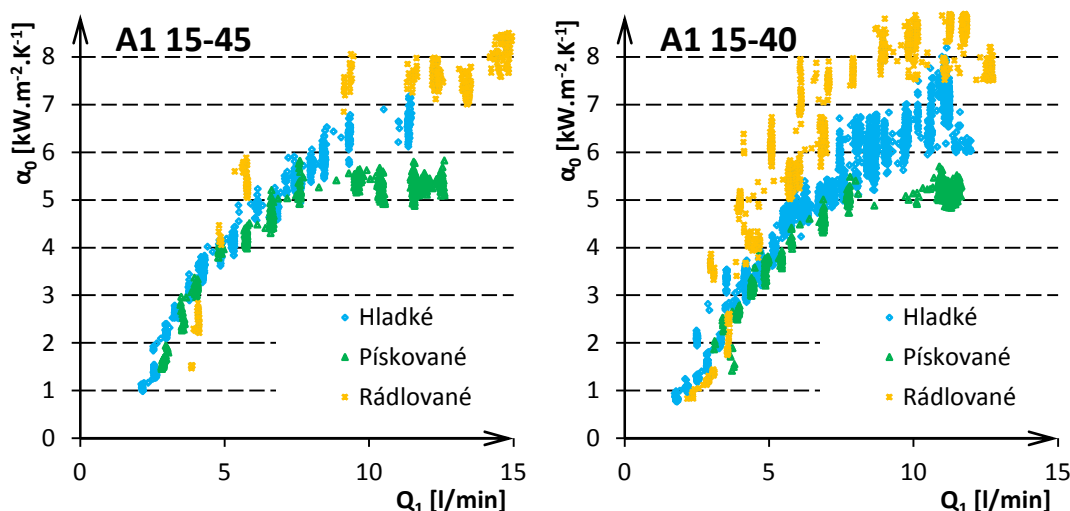
Z porovnání stejné rozteče u jednotlivých povrchů jasně vyplývá, že největší hodnoty součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek je dosažena u rozteče A1. Lze usuzovat, že je to způsobeno dosažením listového režimu, při kterém docházelo k optimální velikosti vodního filmu na povrchu trubek. S rostoucí vzdáleností mezi jednotlivými trubkami v trubkovém svazku klesá hodnota součinitele přestupu tepla. Nejmenší přestup tepla byl odvozen na rozteči A2, přičemž u některých měření byl rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou součinitele přestupu tepla poměrně výrazný. U trubek s hladkým a rádlovaným povrchem lze pozorovat, že u teplotního spádu 15-40 byly naměřeny na rozteči A1 větší maximální hodnoty součinitele přestupu tepla než u spádu 15-45. Rozteče B1 a C1 mají přibližně stejný průběh pro oba teplotní spády. Trubkový svazek s pískovaným povrchem má velmi podobné průběhy pro všechny rozteče s výjimkou rozteče A2 u teplotního spádu 15-45, kdy je hodnota součinitele přestupu tepla

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

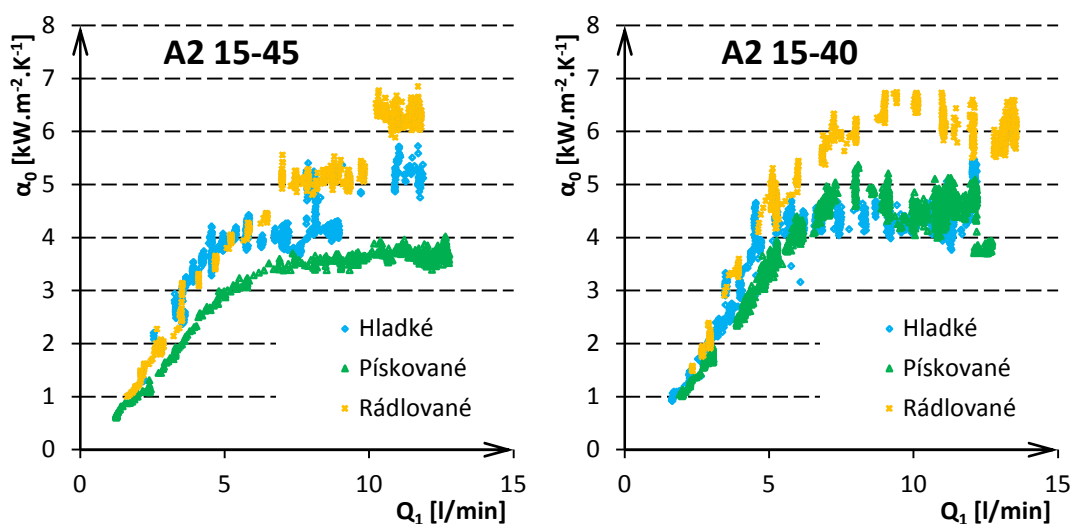
výrazně nižší. Zejména u roztečí B1 a C1 lze dále pozorovat jev, kdy kolem průtoku 7 l/min dochází k výskytu maxima, a následně mají hodnoty součinitele přestupu tepla mírně klesající tendenci.

Dále bylo pozorováno, že do určité velikosti průtoku skrápěcí kapaliny roste součinitel přestupu tepla. Je to způsobeno tím, že při vyšších rychlostech dochází k přeměně kapkového skrápěcího módu na sloupcový. Lze usuzovat, že největších hodnot součinitele přestupu tepla by bylo docíleno při listovém módu. Tohoto skrápěcího módu však vzhledem k velikosti průtoků na jiné rozteči než A1 nebylo dosaženo, vzhledem k technickým možnostem měřicího zařízení.

5.2 Vyhodnocení z hlediska jednotlivých roztečí

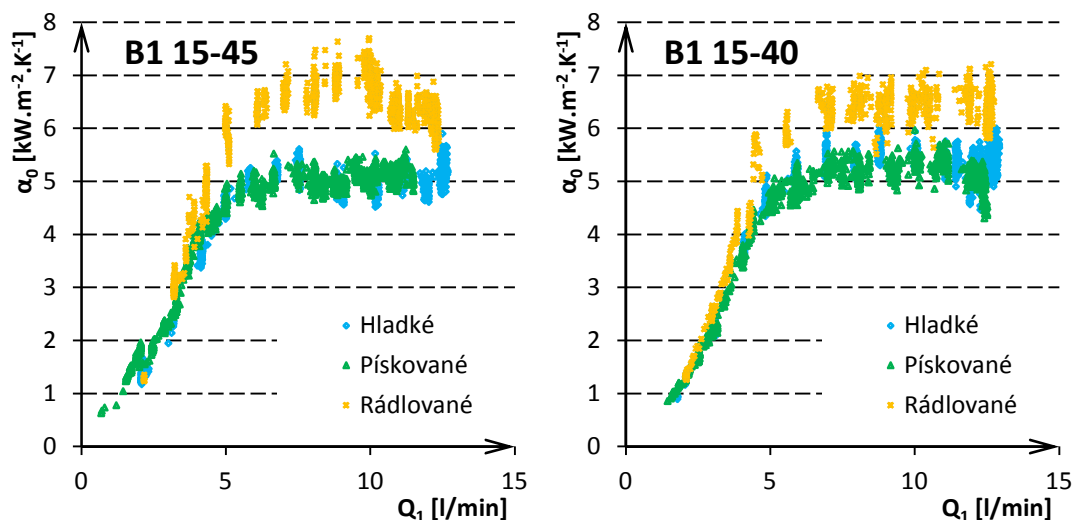


Obr. 15 Rozteč A1

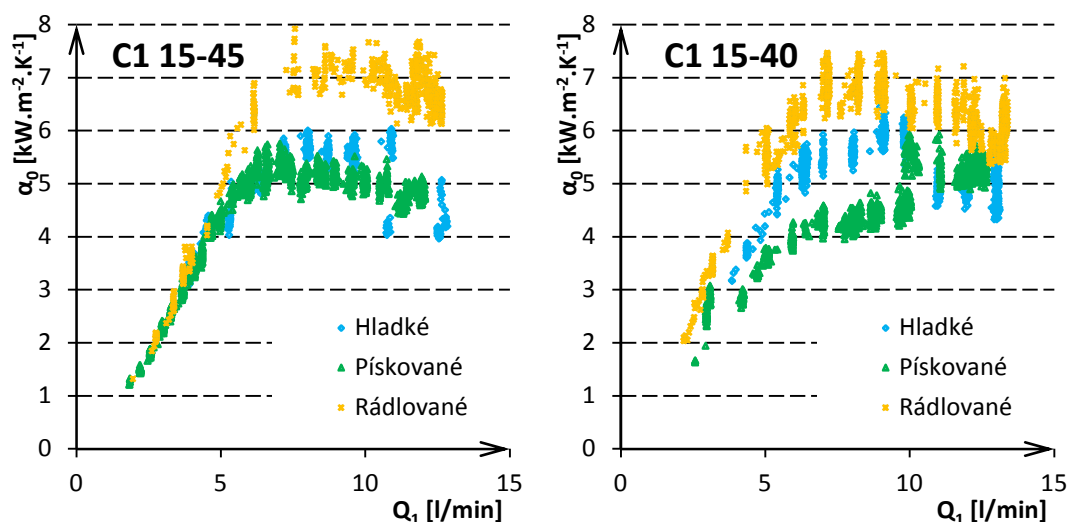


Obr. 16 Rozteč A2

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU



Obr. 17 Rozteč B1



Obr. 18 Rozteč C1

Z hlediska jednotlivých roztečí je patrné, že největších hodnot součinitele přestupu tepla bylo dosaženo v případě trubek s rádlovaným povrchem. Rozdíly oproti trubkám s hladkým a pískovaným povrchem jsou poměrně výrazné. Je to dáno tím, že rádlované trubky mají na povrchu "rýhy", které narušují mezní vrstvu. To způsobuje, že mezní vrstva při těchto teplotách nedosahuje takové tloušťky jako v případě trubek s hladkým či pískovaným povrchem a přestup tepla je tak větší. Trubky s hladkým a pískovaným povrchem vykazují velmi podobný průběh, přestože je u pískovaných trubek povrch zdrsňený, přičemž mírně vyšší součinitel přestupu tepla byl naměřen u trubek s hladkým povrchem. Tyto dva druhy trubek nemají na povrchu žádné prvky, jako např. rýhy u rádlovaných, které by narušovaly mezní vrstvu. Tloušťka mezní vrstvy je tak u těchto povrchů větší a přestup tepla tudíž o něco menší.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

5.3 Vyhodnocení z hlediska teplotních spádů

Pokud jde o rozdíl průběhů součinitele přestupu u různých teplotních spádů, lze při pohledu na grafy konstatovat, že rozdíly nejsou příliš výrazné. U některých měření lze nalézt rozdílné průběhy, např. rozteč A2 u pískovaných trubek, kde u spádu 15-45 jsou hodnoty součinitele přestupu tepla v intervalu nad 5 l/s přibližně o $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ menší. Taktéž průběh rádlovaných trubek se u této rozteče mírně liší, kdy u rozteče 15-40 je větší přestup tepla. Může to být způsobeno také tím, že rozteč A2 je ze všech měřených roztečí největší, a tudíž se zde již může projevovat vliv vzdálenosti mezi jednotlivými trubkami a jistá nedokonalost sousostí trubek. Vyjma tohoto spádu není u ostatních roztečí a povrchů znát žádný výraznější rozdíl mezi jednotlivými průběhy.

Všeobecně tak lze konstatovat, že pro měřené rozteče při zmíněných teplotních spádech nemá změna o 5°C zásadní vliv na průběh součinitele přestupu tepla.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo experimentálně stanovit součinitel přestupu tepla na skrápěném trubkovém svazku. Práce spočívala v experimentálním naměření hodnot, jejich zpracování a následném zhodnocení vlivu velikosti průtoku, rozteče a povrchu skrápěných trubek na průběh součinitele přestupu tepla.

Součinitel přestupu tepla je číslo závislé na mnoha faktorech, např. rychlosti proudění, geometrii trubky a fyzikálních vlastnostech vody a udává, jak intenzivně probíhá přestup tepla mezi povrchem tělesa a tekutinou.

Samotné měření bylo realizováno na experimentálním zařízení v laboratořích Energetického ústavu. Bylo provedeno měření pro dva teplotní spády (15-45 a 15-40), pro tři typy povrchu trubek (hladké, pískované, rádlované) a pro čtyři rozteče v rozmezí od 15 do 30 mm. Měření probíhalo na trubkovém svazku skládajícího se z deseti trubek horizontálně umístěných pod sebou, tj. délka trubkového svazku byla 10m, při atmosférickém tlaku.

Z hlediska jednotlivých roztečí platí, že největší hodnoty součinitele přestupu tepla vykazuje rozteč A1. Je to způsobeno tím, že vzdálenost mezi jednotlivými trubkami je ze všech měřených roztečí nejmenší. Režim skrápění se ze všech roztečí nejvíce blíží listovému. S rostoucí vzdáleností mezi jednotlivými trubkami klesá hodnota součinitele přestupu tepla. Nejmenší přestup tepla byl naměřen na rozteči A2. Rozteče B1 a C1 mají přibližně stejný průběh.

Co se vlivu jednotlivých povrchů na součinitel přestupu tepla týče, bylo zjištěno, že největšího přestupu tepla bylo dosaženo u trubek s rádlovaným povrchem. Rozdíly oproti trubkám s hladkým a pískovaným povrchem jsou poměrně výrazné. Je to způsobeno tím, že rádlované trubky mají na povrchu "rýhy", které narušují mezní vrstvu. To způsobuje, že mezní vrstva tím pádem nedosahuje takové tloušťky jako v případě trubek s hladkým či pískovaným povrchem a přestup tepla je tak větší. Trubky s hladkým a pískovaným povrchem vykazují velmi podobný průběh, přičemž mírně vyšší součinitel přestupu tepla byl naměřen u trubek s hladkým povrchem. Tyto dva povrchy nemají na povrchu žádné výrazné prvky které by narušovaly mezní vrstvu. Tloušťka mezní vrstvy je tak u těchto povrchů větší a přestup tepla tudíž o něco menší.

Pokud jde o vliv rozdílných teplotních spádů na průběh součinitele přestupu tepla, u obou roztečí lze pozorovat velmi podobné průběhy. Výjimkou je rozteč A2, kde trubky s pískovaným a rádlovaným povrchem vykazují rozdílné hodnoty. Tyto rozdíly mohou být způsobeny vlivem vzdálenosti jednotlivých trubek mezi sebou (30 mm). Všeobecně lze ale konstatovat, že pro měřené rozteče nemá změna o 5°C významný vliv na průběh součinitele přestupu tepla.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

\dot{Q}_S	[W]	- celkový tepelný tok
\dot{Q}_1	[W]	- teplo přiváděné skrápěcí kapalinou
\dot{Q}_2	[W]	- teplo odváděné skrápěcí kapalinou
\dot{Q}_3	[W]	- teplo přiváděné médiem do výměníku
\dot{Q}_4	[W]	- teplo odváděné médiem z výměníku
\dot{Q}_Z	[W]	- tepelné ztráty ve výměníku
μ_t	[-]	- termická účinnost tepelného výměníku
n	[-]	- počet řad teplosměnných trubek
r_i	[m]	- vnitřní průměr trubky
r_o	[m]	- vnější průměr trubky
t_i	[°C]	- teplota média uvnitř trubky
t_o	[°C]	- teplota média vně trubky
t_{Si}	[°C]	- teplota na vnitřní straně stěny trubky
t_{So}	[°C]	- teplota na vnější straně stěny trubky
t_1	[°C]	- teplota skrápěcí kapaliny na vstupu
t_2	[°C]	- teplota skrápěcí kapaliny na výstupu
t_3	[°C]	- teplota média vstupujícího do výměníku
t_4	[°C]	- teplota média vystupujícího z výměníku
α_i	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	- součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky
α_o	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	- součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky
λ_s	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	- součinitel tepelné vodivosti stěny trubky
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	- součinitel tepelné vodivosti média
k_L	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	- součinitel prostupu tepla vztažený na délku
Δt_{ln}	[-]	- logaritmický teplotní spád
l	[m]	- délka trubky
Nu	[-]	- Nusseltovo číslo
Re	[-]	- Reynoldsovo číslo
Pr	[-]	- Prandtlovo číslo
w	[m.s ⁻¹]	- rychlost proudění média v trubce
d_i	[m]	- vnitřní průměr trubky
ν	[m ² .s ⁻¹]	- kinematická viskozita
a	[m ² .s ⁻¹]	- součinitel teplotní vodivosti
ρ	[kg.m ⁻³]	- hustota kapaliny
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	- měrná tepelná kapacita média při konstantním tlaku
\dot{m}	[kg.s ⁻¹]	- hmotnostní průtok v trubce
\dot{V}	[m ³ .s ⁻¹]	- objemový průtok v trubce
U	[V]	- indukované napětí
B	[T]	- hustota magnetického toku
v	[m.s ⁻¹]	- rychlost proudění média
S	[m ²]	- průtočný průřez
Q	[m ³ .min ⁻¹]	- objemový průtok

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] **PAVELEK, M.** *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [2] **JÍCHA, M.** *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 8021420294.
- [3] **JIROUŠ, F.** *Aplikovaný přenos tepla a hmoty*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 207 s. ISBN 9788001045145.
- [4] **FERSTL, Karol.** *Vybrané state z prúdenia a prenosu tepla*. 2. vyd. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 1995, 238 s. ISBN 80-227-0756-2.
- [5] **ČECH, B. a Z. KADLEC.** *Měření teplot v energetice*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 60 s. ISBN 9788024818610.
- [6] **KRACÍK, P.; ŠNAJDÁREK, L.; POSPÍŠIL, J.** *Study of Temperature Fields at Sprinkled Smooth and Sandblasted Tube Bundle*. In Proceedings of the International conference Experimental Fluid Mechanics 2013. 1. Liberec: Technical University of Liberec, 2013. s. 382-389. ISBN: 978-80-260-5375-0.
- [7] **ARMBRUSTER, R. a J. MITROVIC.** *Evaporative cooling of a falling water film on horizontal tubes*. Experimental Thermal and Fluid Science. 1998, roč. 18, č. 3, s. 183- 194. ISSN 08941777. DOI: 10.1016/S0894-1777(98)10033-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089417779810033X>
- [8] **OMEGA - Termočlánky**. [Online] OMEGA Engineering. [Citace: 7. 3. 2014.] <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>.
- [9] **Indukční průtokoměr kapalin**. [Online] ELIS PLZEŇ a.s. [Citace: 5. 3. 2014.] <http://www.elis.cz/cs/produkty/indukcni-prutokomer-kapalin.html>.
- [10] **X-ENG.** *X Steam Tables for MS Excel* [počítačový soubor .xls]. Ver. 2.6. [online]. Freeware. <http://www.x-eng.com/XSteam_Excel.htm>.

PŘESTUP TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Režimy skrápění [7].....	14
Obr. 2 Uzemněný spoj [8].....	18
Obr. 3 Neuzemněný spoj [8].....	18
Obr. 4 Nechráněný spoj [8].....	19
Obr. 5 Schéma indukčního průtokoměru [9]	20
Obr. 6 Měřicí zařízení	22
Obr. 7 Schéma měřicího zařízení.....	23
Obr. 8 Schéma tepelného výměníku	24
Obr. 9 Přestup tepla stěnou	25
Obr. 10 Schéma křížového uspořádání výměníku	26
Obr. 11 Schéma roztečí na trubkovém svazku	28
Obr. 12 Hladký povrch	30
Obr. 13 Pískovaný povrch	30
Obr. 14 Rádlovaný povrch.....	31
Obr. 15 Rozteč A1	32
Obr. 16 Rozteč A2	32
Obr. 17 Rozteč B1	33
Obr. 18 Rozteč C1	33

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled nejčastěji používaných termočlánků [5].....	19
Tab. 2 Rozteče na trubkovém svazku	28
Tab. 3 Sourhn základních naměřených dat	29